

PROJET DE TECHNIQUE D'OPTIMISATION

Optimisation de la gestion des ponts en béton armé par chaînes de Markov



Préparé par **BARRY Mamadou Billo**

Encadré par **Dr. El Mkhalet Mouna**

Table des matières

I.	Introduction :.....	3
II.	Présentation de la classification IQOA	3
III.	Utilisation des données IQOA	5
IV.	Utilisation des chaînes de Markov	6
	a) Justification de l'hypothèse de Markov homogène	6
	b) Détermination de la matrice de transition.....	7
	c) Résultats	7
V.	Optimisation des stratégies de maintenance.....	9
	a) Matrice des coûts	9
	b) Stratégies de maintenance.....	10
VI.	Conclusion :	11
VII.	Bibliographie :.....	13

I. Introduction :

Les ponts et viaduc sont des ouvrages d'art qui permettent de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voie de communication, vallée, etc.) en passant par-dessus cette séparation. Ils sont d'une importance capitale dans le processus de transport des personnes et de leurs biens. Leurs constructions relèvent du monde du génie civil et font appel à un savoir-faire de taille aussi bien en terme des matériaux qu'en terme de science et technique. L'un des plus importants sont ceux construits en béton armé. Elles constituent une partie importante de l'ensemble des ouvrages routiers et ferroviaires. Les ponts en béton armé sont construits en grande majorité au début du XX^{ème} siècle. Aujourd'hui **leurs vieillissements** nécessitent une adaptation des politiques d'entretien et des budgets de maintenance. Nous allons donc dans la suite élaborer un modèle de prédiction pour déterminer l'évolution de ce patrimoine et optimiser les coûts de maintenance selon les politiques choisies. Le patrimoine étudié est un ensemble de ponts en béton armé d'un réseau routier national soumis à l'inspection IQOA (image qualité ouvrages d'art), dont les campagnes ont pour but de donner chaque année une « image » de l'état global du patrimoine des ponts à la charge de la direction des routes. Cette étude se fonde sur les résultats de la classification des ponts en béton armé suivant leur âge et leur état, qui a été réalisée en 1998. **L'évolution de l'état du parc d'ouvrages est déterminée à l'aide des chaînes de Markov.** Les hypothèses d'un tel modèle sont détaillées et justifiées afin de déterminer les matrices de transition entre les divers états décrits par la procédure de notation IQOA.

Une fois ces matrices de transition déterminées, une étude de coût est menée pour déterminer les stratégies de maintenance optimales du parc d'ouvrages.

Le principe de la notation IQOA est de donner une note globale aux ouvrages lors d'inspections ayant lieu en moyenne tous les trois ans et de les regrouper dans cinq classes suivant leur état de dégradation.

II. Présentation de la classification IQOA

Le IQOA (c'est l'image qualité ouvrages d'art) est un outil permettant de suivre l'évolution d'un patrimoine d'ouvrages d'art. Il a été créé en 1994 par la direction des routes en France. Les campagnes IQOA concernent les ouvrages de franchissement national d'une longueur supérieure à deux mètres. L'étude faite dans ce rapport concerne essentiellement **les ponts en béton armé**. Le principe d'IQOA est d'attribuer des notes aux ponts selon leur état. Il existe cinq notes possibles qui sont 1, 2, 2E, 3, 3U (voir tableau ci-dessous).

états	signification
1	ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.
2	Ouvrage : ✚ Dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts. ✚ Dont la structure présente des défauts mineurs. ✚ qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
2E	Ouvrage : ✚ Dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts. ✚ Dont la structure présente des défauts mineurs. ✚ qui nécessite un entretien spécialisé urgent, pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
3	ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
3U	ouvrage dont la structure est gravement altérée et qui nécessite des travaux de réparation urgents liés à l'insuffisance de la capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.

- ✚ Les agents chargés de l'inspection disposent d'un guide leur permettant de déterminer la note globale d'un ouvrage, ce guide répertorie tous les types de défauts connus et les notes à donner dans chacun des cas, la note globale du pont correspond à la plus faible note donnée aux différents éléments.
- ✚ Les défauts entraînant la note 2 ou 2e pour un ouvrage sont des défauts d'équipement, des défauts des éléments de protection ou des défauts de structure mineurs **mais s'ils ne sont pas traités rapidement peuvent entraîner un passage en 3, voire 3u.**
- ✚ Pour les équipements sur l'ouvrage, les défauts concernent essentiellement la chaussée portée, ce sont des défauts de surfaces, des fissurations, des déformations vers le bas. Ces problèmes peuvent être dus à une mauvaise qualité des matériaux, une mise en œuvre défectueuse, ou encore à une fatigue excessive de la couche de roulement sur l'ouvrage.
- ✚ Les défauts peuvent également concerner les bordures de trottoirs : défauts d'alignement, dégradation du revêtement, affaissements du corps du trottoir.
- ✚ Les dispositifs d'évacuation des eaux sur l'ouvrage ou encore les joints de chaussées et de trottoirs peuvent être détériorer. Ils doivent donc être inspecter lors des campagnes.

Notes	Défauts
2	 Étanchéité du tablier (cheminements d'eau de ruissellement, suintements au droit des fissures, présence d'alcali réaction).  Apparition de fissures sur la dalle et les encorbellements dans le cas d'un pont dalle, ou sur les poutres, les hourdis et les entretoises dans le cas d'un pont à poutres sous chaussée en béton armé.  Amorces d'éclatement de parement
2E	
3	Défaillances structurelles de l'ouvrage (les fissures et la dégradation du béton).
3U	

La notation **2E** a pour but de prévenir un passage en **3** ou **3U** en intervenant rapidement et d'éviter ainsi une perte de performance structurelle de l'ouvrage.

Cette différence de niveau des différents états IQOA constituera une justification forte pour l'utilisation de l'hypothèse de Markov dans la suite de l'étude. ***C'est l'état actuel de l'ouvrage qui est primordial et non son passé pour déterminer son état futur.***

III. Utilisation des données IQOA

L'IQOA est une base de données qui présente plusieurs caractéristiques essentielles permettant d'envisager une analyse probabiliste. C'est une base de donnée crée par la direction des routes français et elle possède une taille non négligeable de données. Elle regroupe 9 000 ponts en béton armé permettent de travailler sur un échantillon représentatif. De plus, des informations sur l'ensemble des ponts en béton armé, qu'ils soient récents ou vieux de plus d'une cinquantaine d'années peuvent être obtenues grâce à l'étendue de la plage des âges. L'objectif de cette étude est d'obtenir une loi de vieillissement d'un parc de ponts en béton armé. Il est à noter que les données individuelles concernant chaque pont depuis sa construction ne sont pas accessibles. Une solution est de classer les ponts suivant leur âge et leur état à un moment précis dans le temps. Les proportions d'ouvrages pour chaque âge et chaque état sont alors regroupées dans le vecteur $q(i)$, où i est l'âge du pont :

$$q(i) = (q_1^i, q_2^i, q_{2e}^i, q_3^i, q_{3u}^i)$$

L'hypothèse de cette étude peut s'exprimer ainsi : la répartition des états pour chacun des âges est l'évolution qui serait observée au cours de la campagne pour un patrimoine de ponts donné. Cette méthode repose sur l'étude menée en 1998 par le setra sur le patrimoine IQOA, dans laquelle les ponts en béton armé ont été classés par âges et par états (figure 1). Cette répartition servira de base de données tout au long de l'étude pour déterminer le modèle de vieillissement des ponts en béton armé de manière probabiliste.

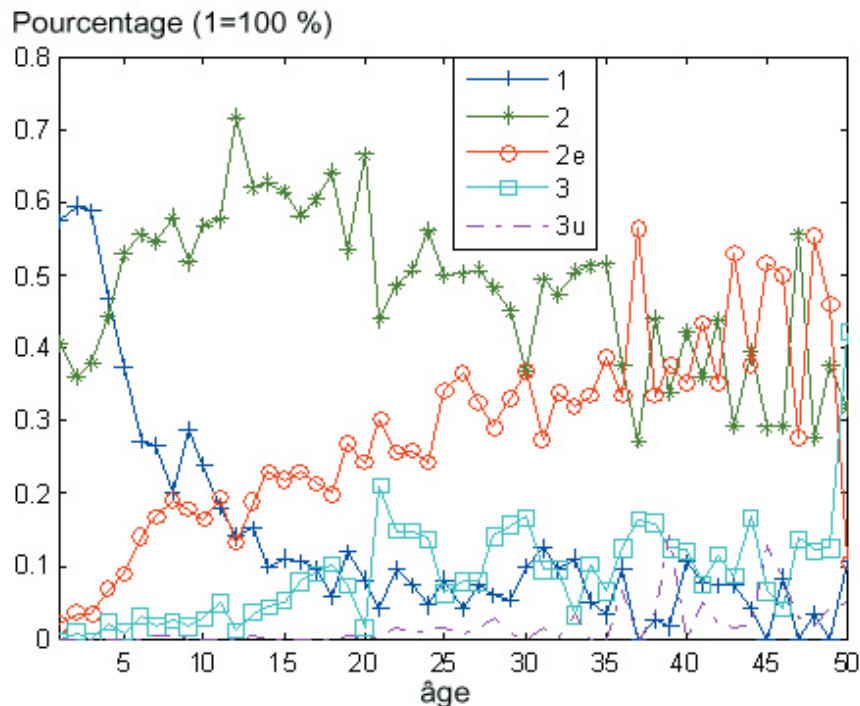


Figure 1

Répartition du patrimoine des ponts en béton armé par âge et par état en 1998.

IV. Utilisation des chaînes de Markov

a) Justification de l'hypothèse de Markov homogène

Une loi déterministe permettant de prédire le processus de détérioration d'un ouvrage quelconque n'existe pas en générale dans la littérature. De plus, l'objectif est d'évaluer la probabilité pour un pont de passer d'un état à un autre dans la classification IQOA. Une approche consiste en l'utilisation de la théorie de Markov qui sera présenté brièvement par la suite.

Une chaîne de Markov est un processus aléatoire dans lequel l'information doit prévoir le futur et elle est contenu dans l'état actuel du processus.

La théorie de Markov nous permettra d'évaluer les probabilités de passage d'un état du pont à un autres.

L'hypothèse de Markov appliqué aux ponts : la probabilité pour un pont d'être dans un état donné lors d'une campagne n ne dépend que de l'état dans lequel il était lors de la campagne $n - 1$ et non des campagnes antérieures. Ainsi c'est seul l'état présent d'un pont qui compte pour déterminer ses états futurs.

Cette hypothèse se justifie par la nature même du patrimoine IQOA. Les différentes classes de notation regroupent des réalités très différentes. Il existe surtout une différence de niveau entre les classes 2 et 2E et les classes 3 et 3U.

Exemple : L'état futur d'un pont qui est classé en 3 va dépendre davantage de ses défaillances actuelles que des défauts d'équipements qu'il a eus dans le passé.

L'hypothèse de l'homogénéité de la chaîne de Markov signifie que les probabilités de passage d'un état à un autre ne dépendent pas du temps. Les probabilités de passage d'une classe à une autre est donc les mêmes quel que soit l'âge des ouvrages concernés. Cette hypothèse d'homogénéité se justifie dans le cas du patrimoine IQOA si on réduit l'étude aux seuls ouvrages construits ces trente dernières années ; ils constituent en effet un ensemble relativement homogène dans leur dimensionnement et leur conception.

b) Détermination de la matrice de transition

On utilise une méthode d'optimisation sous contrainte pour déterminer la matrice de transition $P = (p_{ij})$ $i, j = 1, \dots, 5$

P_{ij} représente la probabilité de passage d'un pont d'un état i à un état j . Le $i^{\text{ème}}$ terme de la somme donnée dans l'équation représente l'erreur entre l'« état réel » à l'étape $i + 1$ et l'état $i + 1$ calculé par le modèle. La somme donnée dans l'équation est donc le total des erreurs commises sur les n années pour lesquelles des données sont disponibles, l'objectif étant de minimiser cette erreur

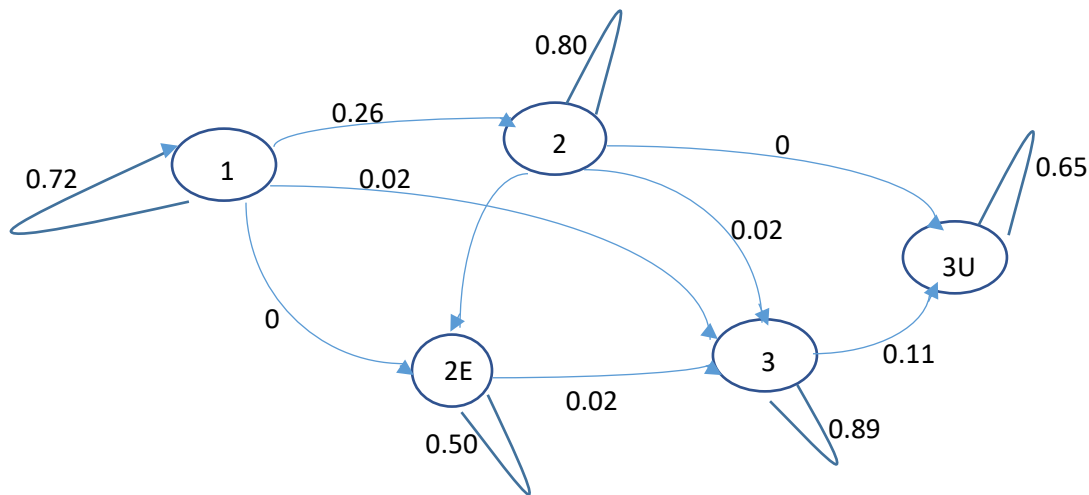
$$\begin{cases} \min_{P \in M_5} \sum_{i=1}^n \| {}^t q(i+1) - {}^t \hat{q}(i+1) \|, \text{ avec } \hat{q}(i+1) = {}^t P {}^t q(i) \text{ et tel que :} \\ \forall k = 1 \dots 5, \forall l = 1 \dots 5, P_{kl} \in [0, 1] \\ \forall k \in [1, 5], \sum_{l=1}^5 P_{kl} = 1 \end{cases}$$

La résolution de ce problème d'optimisation est nécessite une connaissance des équations de Kuhn-Tucker. Ces équations sont des conditions nécessaires pour garantir l'existence de l'optimum d'un problème non linéaire.

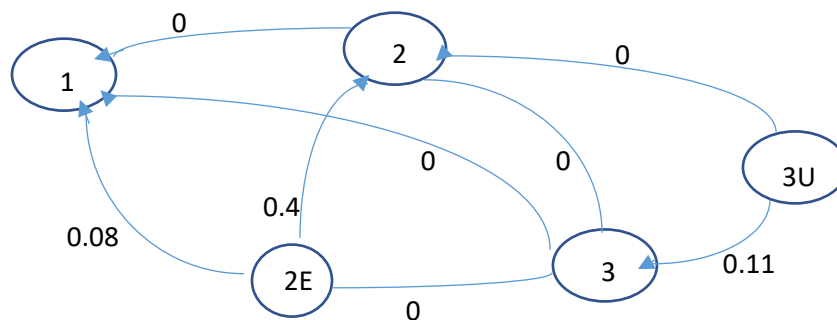
c) Résultats

La matrice de transition traduisant l'évolution du parc d'ouvrages, compte tenu de la politique de maintenance qui lui a été appliquée, a été recherchée en utilisant les données IQOA des ponts Construits entre 1973 et 1993. La matrice de transition obtenue est la suivante :

$$P = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,26 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0,18 & 0,02 & 0 \\ 0,08 & 0,40 & 0,50 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0,11 \\ 0,35 & 0 & 0 & 0 & 0,65 \end{pmatrix}$$



Sens direct : sens de détérioration du pont par passage des états 1 à 3U



Sens inverse : sens de rénovation et d'entretien du pont par passage des états 3U à 1

Remarque :

- ✚ Il y a dans ces schémas toujours une possibilité de passer d'un état à l'autre. Mais on va juste privilégier certains passages à d'autres. Cela s'explique tout simplement par **le coût et l'utilité de la maintenance du pont en question**.
- ✚ Toutes les possibilités de transitions n'ont pas été représentées sur ces graphes par souci de ne pas avoir d'encombrement. Voir matrice de transition pour les autres possibilités restantes.

Pour que la matrice P ait un sens vis-à-vis des politiques qui ont été effectivement appliquées sur le patrimoine entre 1973 et 1993, on fait les modifications suivantes :

- ✚ Les termes en gras dans l'équation dans P ont été fixés à 0. Ainsi, le terme qui traduit le passage de 2 à 1 ou bien celui qui traduit le passage de 3 à 2E ont par exemple été négligés,

car ils correspondent à un type de maintenance rarement mis en œuvre sur le patrimoine IQOA.

- La politique qui a été retenue pour déterminer la matrice de transition est de laisser le patrimoine vieillir et de n'intervenir que si un état nécessitant une intervention urgente est atteint. On utilisera la matrice **P** pour étudier l'évolution du patrimoine en tenant compte des stratégies mises en place.

Etude de la stationnarité : on pose $T_{\infty} * P = T_{\infty}$ avec $T_{\infty} = (x, y, z, t, m)$

Résolution :

$$\begin{cases} 0.72-1 x_1 + 0.26 x_2 + 0 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0 x_1 + 0.8-1 x_2 + 0.18 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0.08 x_1 + 0.4 x_2 + 0.5-1 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0 x_1 + 0 x_2 + 0 x_3 + 0.89-1 x_4 + 0.11 x_5 = 0 \\ 0.35 x_1 + 0 x_2 + 0 x_3 + 0 x_4 + 0.65-1 x_5 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0.72-1 x_1 + 0.26 x_2 + 0 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0 x_1 + 0.8-1 x_2 + 0.18 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0.08 x_1 + 0.4 x_2 + 0.5-1 x_3 + 0.02 x_4 + 0 x_5 = 0 \\ 0 x_1 + 0 x_2 + 0 x_3 + 0.89-1 x_4 + 0.11 x_5 = 0 \\ 1 x_1 + 1 x_2 + 1 x_3 + 1 x_4 + 1 x_5 = 1 \end{cases}$$

On trouve $x = y = z = t = m = 1/5 = 0.2$ avec $x + y + z + t + m = 1$
 $T_{\infty} = (1/5, 1/5, 1/5, 1/5, 1/5)$

V. Optimisation des stratégies de maintenance

a) Matrice des coûts

L'objectif de l'étude de cette matrice est l'optimisation des stratégies de maintenance des ponts d'un point de vue économique tout en maintenant un bon niveau de performance pour les usagers de la route. Les coûts unitaires pour faire passer un ouvrage de la classe i à la classe j ont été évalués lors de précédentes études. Ils ont été regroupés dans la matrice suivante :

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & - & 0 & 0 \\ 36 & 12 & - & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

- ✚ Le coût de référence est celui qui fait passer un ouvrage de l'état 2 à l'état 1 (coût moyen égal à 15 k€ ramené à 1 dans la matrice **C**).
- ✚ Les termes C_{43} et C_{53} n'ont pas de valeur affectée. Car il n'y pas de véritable sens à donner aux termes qui font passer d'un état très dégradé comme 3U ou 3 à l'état 2E. en effet, d'une part, les défauts ne sont pas du même type, ceux des classes 3 étant des défauts de structure alors que ceux des classes 2 sont majoritairement des défauts d'équipement, et, d'autre part, la classe 2E est une classe où un entretien urgent est nécessaire. Il est donc peu probable d'arriver à un tel état si une intervention a eu lieu sur un ouvrage classé 3 ou 3U.
- ✚ Les actions d'entretien courant ne sont pas prises en compte dans cette étude, ce qui fixe les termes de la diagonale à 0.

b) Stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance sont libres d'être choisies par le gestionnaire en fonction du type de maintenance qu'il veut ou peut mettre en place. On doit modifier la matrice **P** pour qu'elle puisse être utilisée dans l'optimisation. En effet, **P** contient des termes sous la diagonale qui correspondent à des actions d'entretien. Ces actions ont été déterminées de manière à suivre au mieux la répartition donnée, mais pas de manière à optimiser les coûts de maintenance. La méthode proposée ici est donc de faire la somme pour chacune des lignes de la matrice **P** des termes sous la diagonale et de l'ajouter au terme diagonal de la ligne en question. La matrice **P'** obtenue est une **matrice de dégradation** qui traduit beaucoup plus mieux la dégradation du patrimoine des ponts. On peut ainsi modifier la matrice **P'** pour tenir compte des différentes stratégies. En voici quelques exemples :

$$S_1 = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,26 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0,18 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0,11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, S_2 = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,26 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0,18 & 0,02 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0,11 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$S_3 = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,26 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0,18 & 0,02 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0,11 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- ✚ La position (i, j) des termes égaux à 1 dans la matrice détermine l'action de maintenance qui va faire passer un pont de l'état i à l'état j.

Exemple : pour s3 :

$$S_3 = \begin{pmatrix} 0,72 & 0,26 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0,18 & 0,02 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0,11 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le pont 2E passe en 1
(réparation d'équipement) →

Le pont 3U passe en 1
(démolition - reconstruction) →

Pour s2 : le pont 2e passe en 2 et le pont 3u passe en 2

Pour s1 : il s'agit de ne rien faire ou plutôt faire que des entretiens courants. Cela se justifie par la forme diagonale supérieur de la matrice.

Il existe des stratégies pour optimiser les couts de maintenances de ces ponts en béton armé.

Pour en savoir plus voir le document de (André Orcesi, Christian Crémone, laboratoire central des ponts et chaussées)

VI. Conclusion :

Nous avons vu dans ce rapport une modélisation de l'évolution du patrimoine des ponts en béton armé géré par IQOA en utilisant la théorie des chaînes de Markov. Les chaînes de Markov constituent un véritable outil pour la construction d'un modèle de prédiction pour ces genres d'infrastructures.

On a également introduit une méthode permettant de faire des études économiques pour déterminer les techniques optimales de maintenances du patrimoine. Cette méthode qui se base sur la matrice de transition des ponts en béton armée crée après les années 1970.

La méthode d'analyse relatif aux ponts en béton armé vu ci-dessus est un peu ancienne, mais peut ce pendent être adopté pour prédire l'évolution de ce type d'infrastructure. En effet des infrastructures ne font que poussé de terre et partout dans le monde, précisément dans les Pays émergents (comme le Qatar, l'Afrique du Sud...) et d'autre Pays en pleine croissance tel que le Maroc qui est l'un des nouveaux pays industrialisés du continent Africain. L'utilisation des chaînes de Markov peuvent également se faire pour d'autres forme d'infrastructures tel que les Barrages, Les gratte-ciel et plus largement toute forme d'ouvrage de Génie civil.

Aujourd'hui on ne parle que de BIM (Building information Modeling) qui n'est qu'un processus impliquant la mise en commun de modèle de données alphanumériques favorisant la coordination et les validations sur les projets de Génie Civil. **Les Chaînes de Markov**

constituerais un outil impeccable qui pourrait être traité dans le cadre du BIM en superposant au couches déjà existantes une couche de prédiction de l'évolution, de la dégradation, mais aussi de l'entretien des ouvrages de Génie Civil.

Comme déjà mentionné le Maroc est un Pays où naissent de grands projets en plus des autres déjà existants. Il y a eu de grands projets de ponts qui ont été réalisés dont : le Pont Mohamed VI, le Pont Hassan II..., l'évolution de ces grands ouvrages doivent être suivie. Les chaînes de Markov peuvent être utilisées lors de cette suivie par la création de Matrice de Transition permettant adaptée à chaque type d'ouvrage. Ainsi une analyse des coûts de maintenances sera plus simple à réaliser. Cette étude de prévision de future pourrait être adoptée par la direction des routes ou le ministère de l'équipement, du transport, de la logistique et de l'eau du Royaume pour assurer une plus grande performance des outils de suivi des infrastructures.

Pour finir, je tiens à remercier **Dr. El Mkhalet Mouna** qui nous a proposé ce projet. En effet, c'est un projet qui m'a permis de comprendre qu'il ne s'agit pas que de faire de la construction en génie civil, mais qu'il s'agit également de faire des optimisations. De ce fait la connaissance des techniques d'optimisation demeure indispensable pour un ingénieur, pour les bureaux d'étude.

VII. Bibliographie :

- ✚ André Orcesi, Christian Crémona, laboratoire central des ponts et chaussées, BLPC •
- ✚ Cours de technique d'optimisation de DR. EL MKHALET MOUNA (Ecole Mohammadia d'ingénieur, Rabat-Maroc) sur les chaines de Markov
- ✚ http://www.setra.fr/html/boa/Data_Base_BOA/Collection_Numeros/boa_33.pdf
- ✚ file:///E:/Billo/Billo/technique%20d'optimisation/Modeling_Bridge_Deterioration_with_Markov_Chains.pdf
- ✚ https://fr.wikipedia.org/wiki/Cha%C3%A9ne_de_Markov